УДК 621.311.031

О. Д. Демов, к. т. н., доц.; О. В. Слободянюк; Д. А. Базалицький

ВИКОРИСТАННЯ ФОРМУЛИ ТЕЙЛОРА ДЛЯ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПІД ЧАС РОЗРАХУНКУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В НИХ

На основі формули Тейлора запропоновано модель розділення функції зниження втрат на два складники: перший – зниження втрат активної потужності, зумовлене дією окремих конденсаторних установок; другий – зниження втрат активної потужності, зумовлене їхньою спільною дією, що дозволяє проводити декомпозицію мережі.

Ключові слова: *декомпозиція мережі, втрати активної потужності, формула Тейлора.*

Постановка проблеми. Зменшення втрат електроенергії в електричних мережах можна досягти за рахунок компенсування реактивної потужності (КРП) у них. Основою наявних методів розрахунку КРП в цих мережах є підхід, який ґрунтується на проведенні таких розрахунків для всієї електричної мережі одночасно [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв’язувати задачу таким чином складно, оскільки:

1) електрична мережа – це ієрархічна система, у якій її частини можуть приймати рішення відповідно до своїх економічних інтересів окремо від інших частин;

2) розв’язання задачі в цілому потребує значних затрат на збір інформації.

Отже, з одного боку, виникають техніко-економічні труднощі розрахунку КРП одночасно для всієї мережі, а з іншого – існує певна незалежність частин електричної мережі під час такого розрахунку.

Тому **мета роботи** полягає в розробці методів розділення електричної мережі під час розв’язання задачі КРП на частини (декомпозиції електричної мережі), що дозволить спростити цю задачу.

Матеріали й результати дослідження. Основною умовою можливості декомпозиції є рівність показників стану КРП мережі до декомпозиції й після неї [3]:

$$\alpha_{\Sigma}(Q_{Kl}) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i (Q_{Ki}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \alpha_{ij} (Q_{Kdi}, Q_{Kkj}), \tag{1}$$

де $\alpha_{\Sigma}\ (Q_{Kl})$ – показник стану КРП для всієї електричної мережі, який є функцією величини потужностей КУ Q_{Kl} під час розв'язання задачі без декомпозиції; l=1…s; s – кількість вузлів електричної мережі, у яких встановлено КУ; $\alpha_i(Q_{Ki})$ – показник КРП i-ої підсистеми, який є функцією величини потужності компенсувальних установок, установлених в i-ій підсистемі Q_{Ki}; i, j = 1…n; n – кількість підсистем електричної мережі; $\alpha_{ij}(Q_{Kdi},\ Q_{Kkj})$ – показник взаємовпливу i-ої та j-ої підсистем, який є функцією величин потужностей компенсувальних установок, установлених в i-ій та j-ій підсистемах Q_{Kki}, Q_{Kkj}; d_i=1…h_i; k_j=1…h_j; h_i, h_j – кількості вузлів відповідно i-ої та j-ої підсистем електричної мережі, у яких установлено КУ; $\sum_{i=1}^{n} h_i = s$.

Із (1) видно, що декомпозиція мережі потребує декомпозиції функції показника компенсації реактивної потужності. Таким показником у більшості випадків є зниження втрат активної потужності.

Розглянемо декомпозицію функції зниження втрат, яка залежить від величини вектора зниження реактивних навантажень $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ (Q_1, Q_2 – відповідно вектори реактивних навантажень мережі до і після їхнього зниження).

Зміна координат вектора Q_1 на величину ΔQ зумовлює зниження функції величини втрат від вектора реактивних навантажень $\Delta P(Q) = \frac{2}{U_н^2} \cdot Q^T \cdot R \cdot Q$ на величину $\delta P(Q)$, яку можна знайти за допомогою формули Тейлора [4]:

$$\delta P(Q) = \left(\nabla P(Q_1)\right)^T \cdot \Delta Q + \frac{1}{2} \cdot \Delta Q^T \cdot \nabla^2 \cdot \left(\Delta P(Q_1)\right) \cdot \Delta Q, \tag{2}$$

де $\nabla P(Q_1)$, $\nabla^2\left(\Delta P(Q_1)\right)$ – відповідно вектор-стовпчик перших похідних від функції $\Delta P(Q)$ за змінними координат вектора реактивних навантажень $Q_i = \nabla^2\left(\Delta P(Q_1)\right)$, симетрична матриця других похідних від функції $\Delta P(Q)$ за змінними Q_i. Відповідно до [2] матриці $\nabla P(Q)$ і $\nabla^2\left(\Delta P(Q)\right)$ для мережі, заданої матрицею вузлових активних опорів *R*, визначають як:

$$\nabla P(Q) = \frac{2}{U_н^2} \cdot \begin{vmatrix} R_{11} & \dots & \dots & R_{1s} \\ R_{21} & \dots & \dots & R_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{s1} & \dots & \dots & R_{ss} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_s \end{vmatrix}; \; \nabla^2(\Delta P(Q)) = \frac{2}{U_н^2} \cdot \begin{vmatrix} R_{11} & \dots & \dots & R_{1s} \\ R_{21} & \dots & \dots & R_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{s1} & \dots & \dots & R_{ss} \end{vmatrix}, \tag{3}$$

де R_{ff} – вхідний опір *f*-го вузла; R_{fp} – взаємний опір *f*-го та *p*-го вузлів; $U_н$ – номінальна напруга мережі; $f, p = 1 \ldots s; f \neq p$.

Підставимо (3) у (2) з урахуванням $\Delta Q_f = Q_{Kf}$, $\Delta Q_p = Q_{Kp}$ й одержимо:

$$\delta P(Q_K) = \frac{2}{U_н^2} \cdot \left[\begin{vmatrix} R_{11} \; \dots R_{1s} \\ R_{21} \; \dots R_{2s} \\ . \;\; . \;\; . \\ R_{s1} \; \dots R_{ss} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_s \end{vmatrix} \right]^T \cdot \begin{vmatrix} Q_{K1} \\ Q_{K2} \\ \dots \\ Q_{Ks} \end{vmatrix} + \frac{1}{U_н^2} \cdot \begin{vmatrix} Q_{K1} \\ Q_{K2} \\ \dots \\ Q_{Ks} \end{vmatrix}^T \cdot \begin{vmatrix} R_{11} \; \dots R_{1s} \\ R_{21} \; \dots R_{2s} \\ . \;\; . \;\; . \\ R_{s1} \; \dots R_{ss} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Q_{K1} \\ Q_{K2} \\ \dots \\ Q_{Ks} \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{2}{U_н^2} \cdot \left(\sum_{f=1}^{s} Q_{Kf} \cdot R_{ff} \cdot Q_f + \sum_{p=1}^{s} \sum_{f=1}^{s} Q_{Kf} \cdot R_{pf} \cdot Q_f + \frac{1}{2} \cdot \sum_{f=1}^{s} Q_{Kf}^2 \cdot R_{ff} \right) + \tag{4}$$

$$+ \frac{1}{U_н^2} \cdot \sum_{f=1}^{s} \sum_{p=1}^{s} Q_{Kf} \cdot Q_{Kp} \cdot R_{fp}.$$

Формула (4) відображає декомпозицію функції зниження втрат $\delta P(Q_{Kf}, Q_{Kp})$ відповідно (1). Вона ділить цю функцію на два складники: перший – зниження втрат активної потужності, зумовлене тільки потужністю Q_{Kf}; другий складник $\delta P\left(Q_{Kf}, Q_{Kp}\right)$ враховує зниження втрат активної потужності, зумовлене спільною дією КУ Q_{Kf} і Q_{Kp}. Це дозволяє проводити аналіз зменшення втрат, зумовлений кожною КУ окремо.

Розглянемо можливість декомпозиції вказаної функції під час установлення КУ в одному вузлі довільної мережі відповідно до (4)

$$\delta P\left(Q_{Kf}\right)=\frac{1}{U_{н}^{2}}\cdot\left(R_{ff}\cdot\left(Q_{Kf}\cdot Q_{f}+Q_{Kf}^{2}\right)+2\cdot Q_{Kf}\cdot\sum_{\substack{p=1\\ f\neq p}}^{s}Q_{p}\cdot R_{fp}\right). \qquad (5)$$

Формула (5) виділяє з усієї схеми мережі її частину (рис. 1), яка бере участь у розрахунку компенсації реактивного навантаження *f*-го вузла.

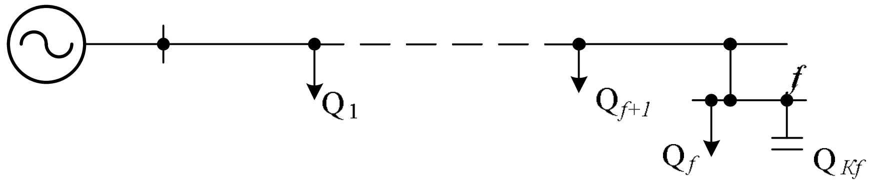

Рис. 1. Частина розрахункової мережі, яка бере участь у розрахунку компенсації реактивного навантаження *f*-го вузла

Використовуючи формулу (4), здійснимо декомпозицію елементарної мережі, заступну схема якої приведено на рис. 2, під час установлення КУ в першому вузлі.

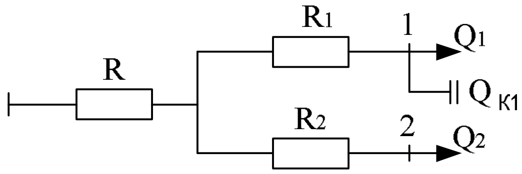

Рис. 2. Заступна схема елементарної мережі: R – значення активного опору живильної мережі; R_1, R_2 – еквівалентні активні опори мереж першої та другої частин електричної мережі; Q_1, Q_2 – реактивні навантаження відповідно першого та другого вузлів

Знайдемо функцію $\Delta P(Q)$ і величину $\delta P(Q_{K1})$ для мережі, зображеної на рис. 2, відповідно до формули (2):

$$\Delta P(Q)=\frac{1}{U^{2}}\cdot\left[\left(Q_1+Q_2\right)^2\cdot R+Q_1{}^2\cdot R_1+Q_2{}^2\cdot R_2\right]$$

$$\delta P(Q_{K1})=\frac{2}{U^2}\cdot\begin{vmatrix}R\cdot\left(Q_1+Q_2\right)+R_1\cdot Q_1\\ R\cdot\left(Q_1+Q_2\right)+R_2\cdot Q_2\end{vmatrix}^{T}\cdot\begin{vmatrix}Q_{K1}\\ 0\end{vmatrix}+\frac{1}{U^2}\cdot\begin{vmatrix}Q_{K1} & 0\end{vmatrix}\cdot\begin{vmatrix}R+R_1 & R\\ R & R+R_2\end{vmatrix}\cdot\begin{vmatrix}Q_{K1}\\ 0\end{vmatrix}=$$

$$=\frac{1}{U^2}\cdot\left(2\cdot Q_{K1}\cdot\left(R\cdot\left(Q_1+Q_2\right)+R_1\cdot Q_1\right)+Q_{K1}^2\cdot\left(2\cdot R+R_1\right)\right).$$

Приклад. Використовуючи розроблений метод декомпозиції, для мережі (рис. 3) необхідно вибрати місце установлення КУ потужністю 50 квар, яке забезпечить максимальне зниження втрат. Вважаємо, що установлювати КУ можна на стороні 0,4 кВ всіх ТП.

На рис. 3 показано основні параметри мережі. Розрахункові реактивні навантаження задано у кварах. У табл. 1 приведено величини активних опорів елементів заданої схеми.

Таблиця 1

Величини активних опорів елементів схеми

Назва елемента на схемі	ТМ 250	ТМ 400	ТМ 630	Ділянки кабельних ліній			
				10-9	9-8	8-7	7-6
Активний опір елемента, Ом	6	3,7	1,9	0,032	0,73	0,05	0,13

Розрахунок проведемо шляхом перебору всіх можливих місць установлення КУ. Для кожного місця установлення визначаємо зниження втрат. Місця установлення КУ вибираємо в тому вузлі, який забезпечує максимальне зниження втрат [5].

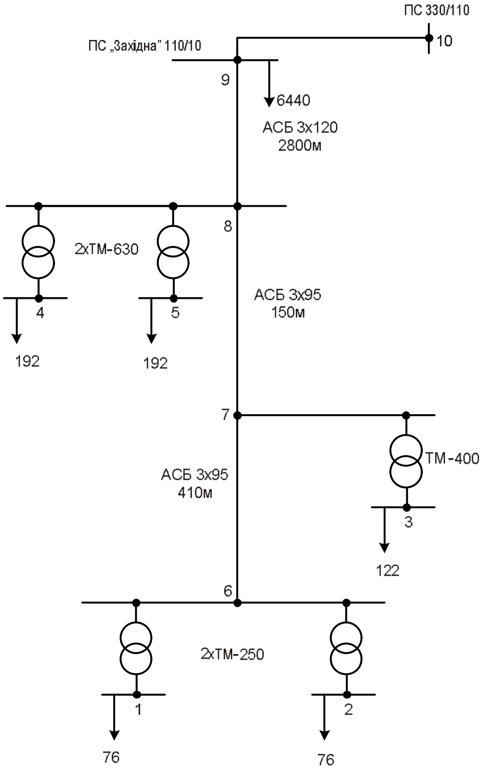

Рис. 3. Схема розрахункової мережі

Під час установлення КУ в 1-му вузлі відповідно до розробленого методу декомпозиції розрахункова схема матиме вигляд (рис. 4), а зниження втрат активної потужності в розрахунковій мережі визначиться як

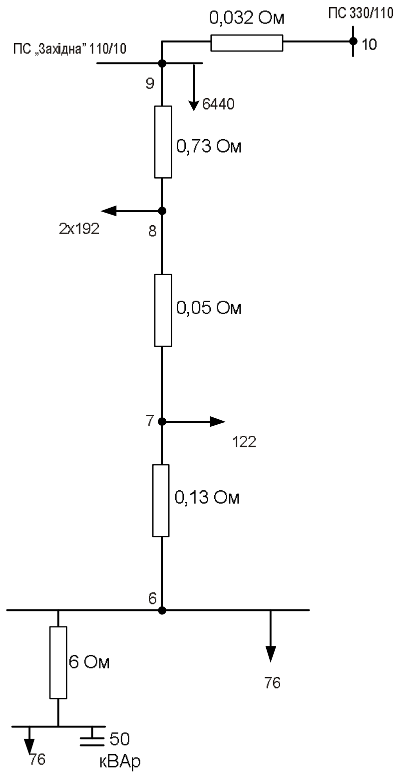

Рис. 4. Розрахункова схема мережі, одержана на основі декомпозиції

$$\delta(\Delta P)_{11} = \frac{1}{U_H^2} \cdot [Q_{КУ1} \cdot 2 \cdot (Q_2 \cdot \left(R_{6-7} + R_{7-8} + R_{8-9} + R_{9-10}\right) +$$
$$+ Q_3 \cdot \left(R_{7-8} + R_{8-9} + R_{9-10}\right) + Q_4 \cdot \left(R_{8-9} + R_{9-10}\right) + Q_5 \cdot \left(R_{8-9} + R_{9-10}\right) + Q_6 \cdot R_{9-10}) +$$
$$+ \left(R_{1-6} + R_{6-7} + R_{7-8} + R_{8-9} + R_{9-10}\right) \cdot \left(2 \cdot Q_1 \cdot Q_{КУ1} - Q^2_{КУ1}\right)] =$$
$$= \frac{1}{10^2} \cdot [50 \cdot 2 \cdot (76 \cdot \left(0{,}13 + 0{,}05 + 0{,}79 + 0{,}032\right) + 122 \cdot \left(0{,}05 + 0{,}79 + 0{,}032\right) +$$
$$+ 192 \cdot \left(0{,}79 + 0{,}032\right) + 192 \cdot \left(0{,}79 + 0{,}032\right) + 6440 \cdot 0{,}032) + \left(6 + 0{,}13 + 0{,}05 + 0{,}79 + 0{,}032\right) \cdot \left(2 \cdot 76 \cdot 50 - 50^2\right)] = 903{,}542 \left(Вт\right).$$

Аналогічно знаходимо величини $\delta(\Delta P)_{1j}$ для інших вузлів:

$$\delta(\Delta P)_{12} = 903{,}542\left(Вт\right);$$
$$\delta(\Delta P)_{13} = 960{,}45\left(Вт\right);$$
$$\delta(\Delta P)_{14} = \delta(\Delta P)_{15} = 933{,}06\left(Вт\right).$$

Оскільки максимальне зниження втрат досягається під час установлення КУ в третьому вузлі, то КУ потужністю 50 квар установлюємо в цьому вузлі.

Висновки

1. На основі формули Тейлора запропоновано модель розділення функції зниження втрат на два складники: перший – зниження втрат активної потужності, зумовлене дією окремих конденсаторних установок; другий – зниження втрат активної потужності, зумовлене їхньою спільною дією, що дозволяє проводити декомпозицію мережі.
2. Під час розрахунку компенсації реактивної потужності в електричній мережі формула Тейлора дозволяє виділити з усієї схеми ту її частину, яка бере участь у цьому розрахунку, і відповідно спростити цей розрахунок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 200 с.
2. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Ф. Ф. Карпов. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.
3. Демов О. Д. Декомпозиція функції втрат активної потужності в електричних мережах при розрахунку компенсації реактивної потужності / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук // Вісник КДУ. – 2010. – № 3.– С. 117 – 120.
4. Реклейтис Г. Оптимизация в технике” В 2-х книгах. Книга 1 / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел; пер. с англ. В. Я. Алтаева, В. И. Моторина. – Москва : Мир, 1986. – 347 с.
5. Демов О. Д. Розрахунок поетапного впровадження конденсаторних установок в розподільні мережі енергопостачальних компаній при дефіциті коштів / О. Д. Демов, А. Б. Миндюк, І. О. Бандура // Новини енергетики. – 2011. – № 4. – С. 38 – 44.

Демов Олександр Дмитрович – к. т. н., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Слободянюк Олег Васильович – магістрант.

Базалицький Денис Анатолійович – студент.
Вінницький національний технічний університет.